以二氧化碳规模化利用技术为核心的碳减排方案

陈倩倩[1] 顾 宇[1] 唐志永[1*] 孙予罕[1,2*]

1 中国科学院上海高等研究院 中国科学院低碳转化科学与工程重点实验室 上海 201210
2 上海科技大学 上海 201210

摘要 碳资源是人类社会发展进入工业时代的基石。人类大量使用含碳资源产生的二氧化碳（CO_2）不应给人类社会带来威胁，更不应是碳资源利用的终结者，而是人类实现可持续发展必须善加利用的资源。文章在国内 CO_2 利用技术研发取得了可喜进展的基础上，提出了几种未来可能适合于中国的以 CO_2 规模化利用技术为核心的碳减排方案，包括化石能源耦合 CO_2 的转化利用技术、零碳能源耦合 CO_2 的转化利用技术以及温和条件下 CO_2 直接转化利用技术等。基于我国能源消费结构、短中期化石能源的主导地位以及可再生能源日新月异的发展，化石能源的易获取性和低成本使得其耦合 CO_2 的转化利用技术方案近年来飞速发展，并可能将在近期带来巨大碳减排潜力和经济效益；零碳能源发电技术的突飞猛进有利于核能/可再生能源发电耦合 CO_2 生产燃料化学品技术的发展，成为中期最具竞争力的 CO_2 大规模利用技术；远期来说太阳能驱动的 CO_2 温和转化可以实现真正意义上的生态碳循环，是远期最有前景的 CO_2 还原技术。

关键词 二氧化碳利用，化石能源，零碳能源，碳减排

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.04.013

能源是中国经济社会发展的重要制约因素，事关经济安全和国家安全[1]。据 2018 年《国民经济和社会发展统计公报》数据[2]，2017 年中国能源消费总量为 44.9 亿吨标准煤，其中煤炭消费占比 60.4%，在能源构成中仍处于主体性地位。中国以煤为主的资源禀赋和能源消费结构，一方面为经济的快速增长提供了能源保障，另一方面也导致了二氧化碳（CO_2）的大量排放。根据全球碳计划组织发布的预测报告，2018 年全球碳排放预计增加 2%，中国的碳排放量约占 27%，仍是全球最大的碳排放国[3]。目前，中国经济正处于重化工业主导的工业化和城市化阶段，加上以煤为主的能源结构等多方面原因，未来将继续处

*通讯作者
资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（XDA21090204）
修改稿收到日期：2019年3月28日

于 CO_2 排放的上升期。基于我国政府明确提出控制温室气体排放的行动目标，到 2020 年单位国内生产总值 CO_2 排放比 2005 年降低 40%—45%，2030 年左右实现 CO_2 排放达到峰值并努力争取早日达峰，意味着实现高碳资源的低碳化利用和 CO_2 减排技术的规模化发展刻不容缓。

自然界碳循环的基本过程为大气中的 CO_2 被陆地和海洋中的植物吸收，然后通过生物或地质过程以及人类活动，又以 CO_2 的形式返回大气中，每年有数十亿吨的碳，在陆地、大气和海洋之间进行着快速的碳循环运动（图 1）[4]。而这种平衡随着人类社会的飞速发展被打破，能源燃烧等人为制造的 CO_2 排放远远超过了自然界所能吸收转化的容量。每年的 CO_2 新增量中，60% 的 CO_2 排放至大气中，剩余的大部分 CO_2 进入到海洋，少量被陆地生物吸收。然而，自然界能承载的 CO_2 上限为 30 亿吨碳/年，这意味着目前的 CO_2 排放量需降低 60%—70%，即大约减排 50—70 亿吨碳/年[5]。碳循环是一个氧化-还原过程，大气中 CO_2 的累积本质是人类活动引起的碳氧化（燃烧）与还原的不对称性，一定程度上实现减少使用碳或还原使用 CO_2 是实现低碳化的本质。CO_2 的还原需要消耗能量并控制选择性，这将成为未来碳科学与技术的主旋律，其核心是 CO_2 的选控转化利用以及其与非碳能量的耦合。

基于我国的能源消费结构以及化石能源仍将在很长一段时期内作为能源供应的主体，针对 CO_2 的转化利用技术即 CO_2 的可控性还原，本文对化石能源耦合 CO_2 的转化利用技术、零碳能源（包括可再生能源和核能）耦合 CO_2 的转化利用技术，以及 CO_2 直接转化利用技术的进展情况进行了梳理，并对 CO_2 转化利用技术引起的碳减排潜力进行了分析。

1 以甲烷-二氧化碳干重整为核心的转化利用技术

甲烷（CH_4）和 CO_2 作为影响全球气候变化的主要温室气体，使用甲烷-二氧化碳干重整技术提供了一条转化 CH_4 和 CO_2 这两个难活化资源的技术路线，对于高效利用碳资源以及减缓全球温室效应有重要的现实意义和经济价值。甲烷-二氧化碳干重整过程产生氢碳比小于 1 的合成气，可以直接作为羰基合成或费托（F-T）合成的原料，也适用合成气直接制烯烃（FTO）的路线（图 2），弥补了甲烷水蒸气重整过程中合成气氢碳比较高的不足。显然，甲烷-二氧化碳干重整技术不仅可用于天然气的转化，而且还可广泛应用于页岩气、煤层气、能源化工企业弛放气和焦炉气等富甲烷气，更适合于南海富 CO_2 天然气的开发。

甲烷-二氧化碳干重整制备合成气是一种极具产业化利用前景的化工过程。其主要优势为：① 该过程将煤化工大量存在的 CH_4 和 CO_2 转化成为具有高附加值的化学品，具有巨大的经济效益；② 该过程同时利用

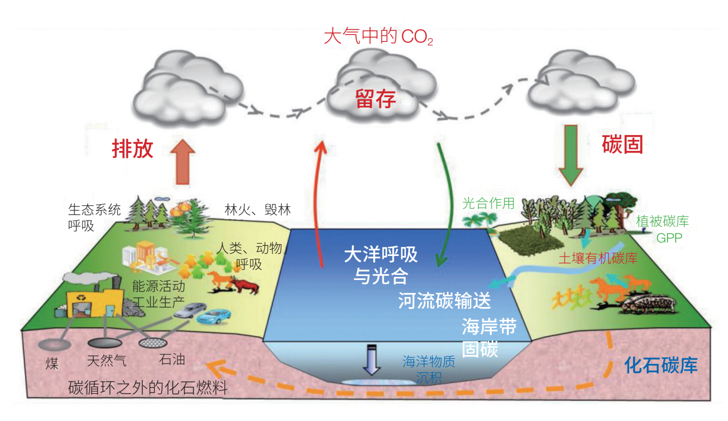


图 1　自然界碳循环过程

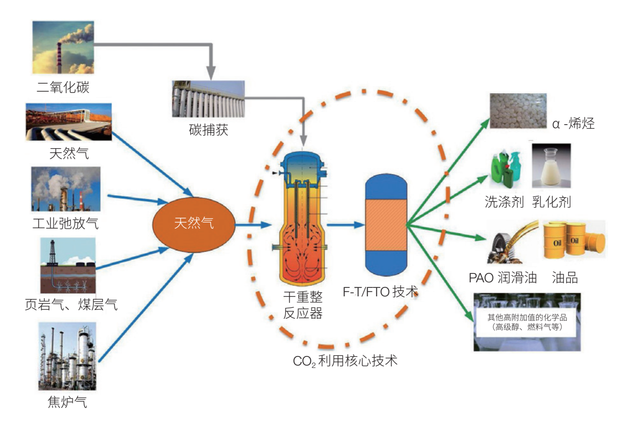


图 2　以甲烷-二氧化碳干重整为核心的技术路线图

了 CO_2 和 CH_4 两种温室气体，具有一定的环保效益；③ 通过甲烷-二氧化碳干重整反应得到的合成气具有较低的氢碳摩尔比，这非常有利于下游的工业应用。

甲烷-二氧化碳干重整制备合成气，在过去几十年中受到越来越多的关注。但是，由于该反应为强吸热反应，导致其所需反应温度较高（通常高于650℃），会产生严重烧结和积碳问题，从而使催化剂失活。近年来，围绕高温催化剂失活问题的解决及专用反应器开发的研究备受关注。中国科学院福建物质结构研究所谢奎课题组通过固体氧化物电解池将二氧化碳电解和甲烷氧化两个气相电化学转化过程结合，实现了电催化甲烷/二氧化碳制合成气[6]。在国家科技支撑计划、中国科学院战略性先导科技专项“低阶煤清洁高效梯级利用关键技术与示范”等的支持下，中国科学院上海高等研究院、潞安集团和荷兰壳牌公司三方联合开展了甲烷-二氧化碳干重整制合成气关键技术的研究，实现了全球首套甲烷-二氧化碳干重整万方级装置（图3）的稳定运行，装置日转化利用 CO_2 60 吨，标志着我国自主知识产权的重整技术处于国际领跑地位[7]。该技术已于 2017 年 8 月 2 日通过了中国石油和化学工业联合会组织的技术标定，具备了工业化示范应用的条件。该技术预计甲烷-二氧化碳干重整制备合成气的成本在 500—600 元/吨合成气，与煤制合成气技术成本相当，相比较于目前传统的水蒸气重整，其合成气生产成本可以降低 20%。

以南海富 CO_2 天然气的高效利用为例，我国南海天然气的组成与内陆其他地区有很大的不同，其特点是含有高浓度的 CO_2，CO_2 含量普遍在 20%—80%。以 CO_2 含量为 50% 的南海天然气为基准，经过干重整后耦合合成气直接制烯烃（FTO）工艺生产高附加值单体 α-烯烃和高级醇等产品。其烯烃产品包括乙烯、丙烯、丁烯、C5—C9 馏分、C10—C13 馏分和 C14+ 馏分，平均市场价为 8 421 元/吨。该生产系统单位投资约为 2.48 万元/吨烯烃，基于 0.7 元/标方的南海富碳天然气价格，扣除该工艺副产的高级醇和燃料气等产品后，烯烃的净生产成本为 4 414 元/吨；考虑 12% 的投资回收率，烯烃盈亏平衡价为 7 325 元/吨，低于烯烃产品的平均市场价，具有良好的经济竞争力。



图 3　全球首套万方级甲烷 - 二氧化碳干重整制合成气装置

根据《能源发展“十三五”规划》[8]，到 2020 年天然气在能源消费结构中所占比例将提高到 10% 以上。同时，据预计，2020 年中国天然气需求将增至 2 900 亿立方米，2030 年达到 4 800 亿立方米，发展潜力巨大[9]。基于目前天然气的利用方式，约 15% 的天然气作为化工用气使用，假设 2020 年和 2030 年天然气化工用气中 30% 的比例用于甲烷-二氧化碳干重整耦合合成气直接制烯烃技术，则 2020 年可实现各类烯烃产量约为 740 万吨，同时直接消耗 CO_2 约 1 020 万吨。该技术可生产各类国内市场急需的单体 α-烯烃和聚 α-烯烃（PAO）基础油，产品附加值非常高，

2020年产值可达840亿元。2030年随着天然气消费量的上升，该技术生产的各类烯烃规模可达1 300万吨，直接消耗CO_2约1 700万吨，产值高达1 390亿元。

若以我国焦炉气为例，按全国年产焦炭2.4亿吨计，则每年可副产焦炉气720亿立方米。目前至少有1/3以上的焦炉气未加以利用，既浪费了宝贵资源，又造成环境污染。焦炉气为富氢气体，通过CO_2与焦炉气的重整，可以得到合适氢碳比的合成气。如将排放的焦炉气加以利用，一方面可以每年减少约1 000万吨的CO_2，至少可生产1 300万吨甲醇（CH_3OH）或生产400万吨的油品，市场容量达到200多亿元。

针对甲烷-二氧化碳干重整工艺，未来需要解决的关键技术问题主要包括：完善催化剂结构和性能与规模生产工艺参数之间的关系，实现规模化耐高温抗积碳高效催化剂的制备工艺；通过整体系统的热能利用和系统强化，解决并实现反应器优化及其与高效移热设备的匹配，实现干重整技术的规模化应用。

2 零碳能源耦合二氧化碳的转化利用技术

CO_2是一种自然界大量存在的“碳源”化合物，若能借助零碳能源（可再生能源、核能等）电解水制得的氢气（H_2）将CO_2转化为有用的化学品或燃料，将同时帮助解决大气中CO_2浓度增加导致的环境问题、化石燃料的过度依赖以及可再生能源的存储问题（图4）。汽油和航空煤油等烃类化合物是重要的运输燃料，在世界范围内应用广泛、具有很高的经济价值。诺贝尔化学奖获得者Olah[10]提出了“人工碳循环”的概念，若借助零碳能源将CO_2直接转化为液体燃料可使得整个碳循环更加有效。目前，CO_2资源化利用的研究主要集中在CH_3OH、甲酸（HCOOH）、CH_4和一氧化碳（CO）等简单小分子化合物的合成，然而，受限于CO_2分子的化学惰性和有效催化剂体系的开发，将其转化为含有2个以上碳原子的化合物仍

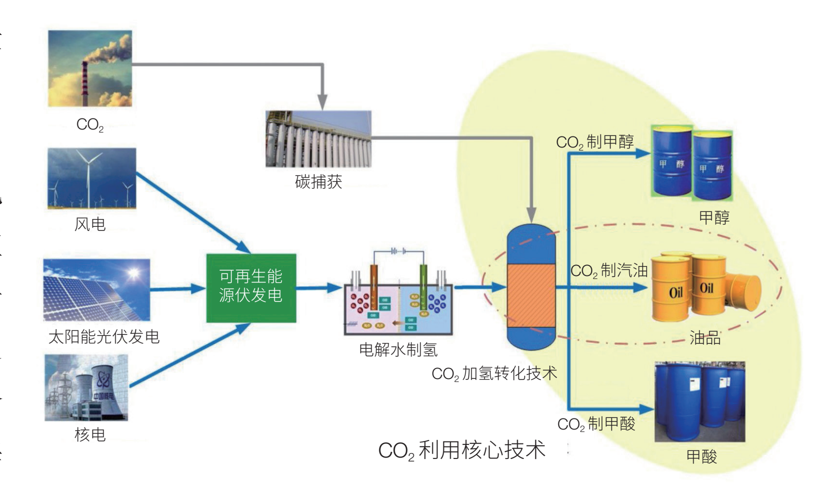


图4 零碳能源耦合二氧化碳的转化利用路线图

然是一巨大的挑战。

近年来，用于CO或CO_2加氢转化的高性能催化剂的开发受到广泛关注。中国科学院大连化学物理研究所（以下简称“大连化物所”）葛庆杰课题组开发的催化剂[11]，实现了CH_4和CO的低选择性，使CO_2加氢直接合成汽油的选择性达到78%。大连化物所包信和课题组[12]与厦门大学王野课题组[13,14]开发的复合催化剂，发展了不经费托途径的合成气直接转化制烯烃新路线，将低碳烯烃选择性提高到70%以上。中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家实验室曾杰课题组开发了新型氮化钴催化剂[15]，大幅提升了CO_2加氢反应的活性。大连化物所催化基础国家重点实验室李灿团队在CO_2催化加氢制备芳烃研究方面也取得新进展[16]，通过开发的新型催化剂体系直接将CO_2高选择性的转化为芳烃，为CO_2转化拓展了新的思路。

中国科学院上海高等研究院研究团队通过成功设计新型高性能催化剂[17]，在CO_2加氢一步转化高选择性合成汽油方面取得新突破（图5）。在该催化剂上，CO_2加氢烃类产物中汽油馏分的选择性高达80%，而CH_4仅有1%，且烃类组分以高辛烷值的异构烃为主，因此是航空汽油和车用汽油的优良替代燃料，具备了示范应用的条件。该工作被认为是CO_2转

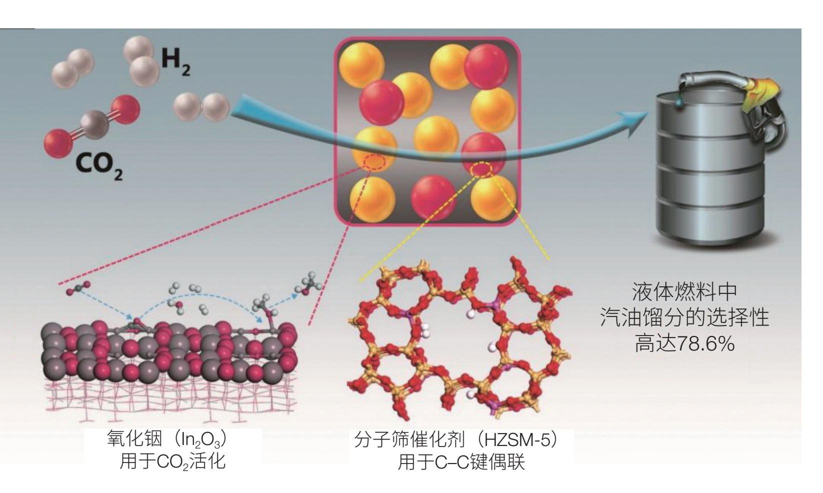


图5　二氧化碳加氢直接制汽油生产路线

化领域的一大突破，为 CO_2 转化为化学品及燃料提供了重要的平台。

以核能耦合 CO_2 加氢直接制汽油为例，采用高温气冷堆驱动的高温蒸汽电解工艺为：单位氢气的生产能耗为34.01千瓦时/千克，以0.3元/千瓦时的核能发电电价为基准，所产氢气的盈亏平衡价为13.42元/千克。采用 CO_2 加氢制汽油工艺生产高附加值的油品，吨油品耗氢量为6 000立方米，其中汽油的选择性为78.6%，扣除燃料气等副产品后，汽油生产成本为7 622元/吨。基于我国目前的汽油出厂价，考虑未来化石能源利用的限制，国家对清洁燃料的推广以及碳税政策的实施，当碳税高于286元/吨时，该系统的经济竞争力将逐渐显现。

截至2018年底，我国投入商业运行的核电机组额定装机容量达到44 645.16兆瓦时，累计发电量为2 865.11亿千瓦时。根据中国《电力发展"十三五"规划》[18]，2020年全国核电装机将达到5 800万千瓦，2030年将进一步达到1.36亿千瓦，发电量达到约10 000亿千瓦时。若考虑用于该技术的核能发电量比例2020年为10%，2030年上升至30%。则2020年使用核能耦合 CO_2 制汽油工艺，可生产清洁汽油155万吨，生产过程直接消耗 CO_2 610万吨，实现产值93亿元，CO_2 总减排量达1 063万吨；2030年，汽油产品增加至1 100万吨，直接消耗 CO_2 4 280万吨，实现产值高达660亿元，CO_2 总减排量进一步上升至7 480万吨，具有巨大的经济效益和环保效益。

针对零碳能源耦合二氧化碳的转化利用工艺，未来需要解决的关键技术问题包括：开发廉价高效的电极材料，实现工业级电解水工艺的开发；通过合成方法学、新材料与新结构的创制、催化构效关系的认识等，实现高活性、高选择性和高稳定性催化剂的规模化制备；解决反应器与催化剂匹配过程强化技术，克服传递过程限制，有效提升反应器效率与操作弹性、稳定性。

3 面向未来的二氧化碳直接转化利用技术

采用传统化学方法还原 CO_2 需要同时消耗能量和 H_2 等还原性气体，而采用光催化或者电催化 CO_2 转化，采用太阳能或者可再生的风电、太阳能发电或富余核电等洁净电能为能源，在常温、常压条件下将 CO_2 直接一步转化为CO、HCOOH、CH_3OH、碳氢化合物等燃料及化学品，同时实现了 CO_2 的资源化利用和洁净电能的有效存储，表现出极具潜力的应用前景（图6）。如何高效率地获得高附加值的化学品是该领域极具挑战性的热点课题。

中国科学院上海高等研究院-上海科技大学低碳能

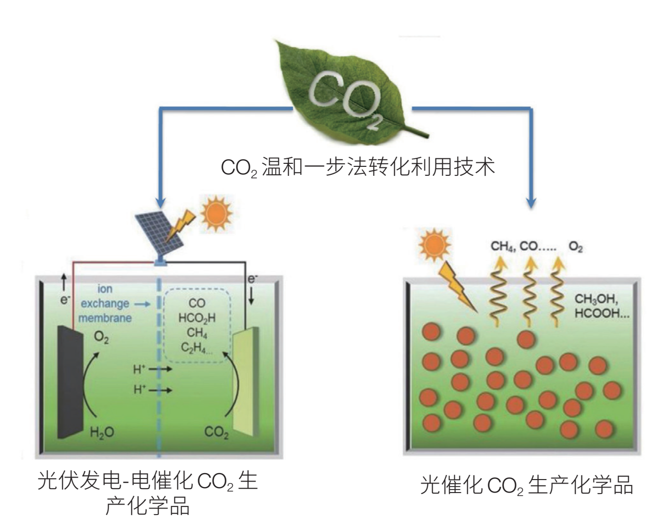


图6　二氧化碳直接转化利用技术路线图

源联合实验室在电催化 CO_2 还原转化生成 HCOOH 和乙醇（C_2H_6O）方面均取得重要进展[19,20]，所制备的新型合金催化剂具有非常优异的性能，只需施加非常低的电压，该催化剂就能够将所输入电能的 99% 用于驱动 CO_2 转化生成 HCOOH，显示出良好的应用前景。此外，该研究团队在前期工作的基础上，开发了新型纳米催化剂，成功实现了 CO_2 直接转化生产 C_2H_6O。此项研究工作为设计、创制高活性和高选择性生成多碳产物的电催化体系提供了新思路，受到业内专家的高度评价。大连化物所李灿团队长期致力于光催化和光电催化 H_2O 和 CO_2 方面的研究，并针对一些含高浓度 CO_2 和硫化氢（H_2S）的天然气田，提出并实现了一种光电驱动的将 CO_2 和 H_2S 协同转化为化学品的策略[21]。中国科学技术大学俞书宏课题组与加拿大多伦多大学在电催化 CO_2 制备多碳醇燃料方面取得了重要进展[22]，首次提出在 CO_2 的电还原过程中，通过调控反应步骤，实现高效多碳醇的选择性制备。

尽管人们很早就开始了这一领域的研究，但是无论电催化或者光催化还原 CO_2 目前仍存在许多技术问题需要克服。由于该技术仍处于实验室研究阶段，所开发的光催化剂基本都存在光能利用效率很低的问题，因此该技术在未来一段时间内都不具备经济竞争力。对于电催化，如何避免过多的能量浪费、提升转化效率和提高产物选择性是其亟待解决的关键问题。光催化还原 CO_2 也存在太阳能利用率低、光催化材料对 CO_2 吸附性能差及碳氢化合物的产率低等问题。因此，CO_2 温和转化和直接利用实现商业化之路仍然任重道远。

4 国外二氧化碳规模化利用的研究进展

气候变化深刻影响着人类的生存和发展，是全球共同面临的重大挑战，实现 CO_2 的循环、转化和大规模利用也成为全球共同关注的焦点。针对 CO_2 资源化、规模化利用的研究，国外主要集中在 CO_2 的生物利用，温和条件下直接转化，可再生能源驱动的 CO_2 光、电催化等方面。比利时根特大学使用开发的复合型催化剂[23]，发明了“甲烷超干重整”的新工艺，提高了 CO_2 的转化率，并得到了富 CO 的产物。英国利物浦大学设计了一种具有特殊结构的反应器[24]，将反应温度控制在室温（~30℃）状态，成功实现了常温、常压下将 CH_4 和 CO_2 一步转化为乙酸（CH_3COOH）、CH_3OH、C_2H_6O 等高值化学品，其中液体产物总选择性最高可达 59.1%。加拿大多伦多大学开发了一种新型的催化剂[25]，能够高选择性地将 CO_2 还原为乙烯（C_2H_4），其中 C_2H_4 产品与 CH_4 的选择性比达到 200 左右，为 CO_2 还原为可再生燃料和原料并实现大规模、长期的能源储存提供了机会。日本庆应大学开发了一种性能优越，耐久稳定的金属电极[26]，实现了高效的 CO_2 电化学还原制 HCOOH 技术，HCOOH 的选择性大于 99%。美国伊利诺伊大学芝加哥分校和阿贡国家实验室开发了一种高效的纳米结构催化剂，并设计出一种新型太阳能电化学催化反应装置[27]，能在低过电位下于离子液体中直接将 CO_2 转化成合成气（CO 和 H_2），生成 CO 的效率可达传统催化剂的 1 000 倍，整个过程廉价且高效，稳定性好。

5 二氧化碳规模化利用的战略建议

CO_2 是全球排放量最大的温室气体，同时也是亟待开发利用的碳资源。实现 CO_2 转化利用的规模化发展对于缓和全球气候变化问题及推动传统产业转型升级均具有重大意义，是国内外科学界与工业界的重要研究方向。基于 CO_2 转化利用技术的研究进展、商业化示范及推广状况、零碳能源发电的经济性以及化学品市场需求和经济价值，概述了 CO_2 规模化利用技术发展前景并对相关技术的发展提供了若干建议。

（1）天然气及非常规天然气、焦炉气、工业弛放

气等富 CH_4 气体与 CO_2 经干重整生产合成气目前已取得了较好进展，具备了工业化示范的条件。可在近期优先发展以 CO_2 干重整制合成气为核心的转化利用技术。针对干重整合成气的下游利用，可根据原料气干重整后合成气的氢碳比选择性耦合甲醇、油品或烯烃技术。考虑到国内市场需求及产品价值，可优先发展甲烷-二氧化碳干重整耦合合成气直接制烯烃工艺生产高附加值的α-烯烃和PAO基础油等。

（2）随着可再生能源发电效率的上升及成本的剧烈下降，使得零碳能源（核能/可再生能源）耦合 CO_2 生产燃料化学品的技术在近中期或中期会有重大进展。目前核能发电的连续性及耦合高温电解制氢的高效性和经济性使得近、中期使用核能制氢耦合 CO_2 的转化利用技术成为优选。甲醇、汽油作为优质替代燃料，成为该技术下游燃料化学品生产的主导产品，其中 CO_2 加氢生产的清洁汽油馏分作为高性能的航空煤油、车用替代燃料，更具发展优势。

（3）取于自然，归于自然，直接利用太阳能在常温常压下温和地转化 CO_2 是研究人员长久以来的梦想，其可真正实现碳资源的循环使用。随着太阳能光电催化、光催化技术的发展，这项技术或将成为 CO_2 转化利用最具前景的方法，并有望在远期得到突破性发展。

6 结论和展望

CO_2 的产生是必然的，在自然界的存在也是合理的。CO_2 是人类实现可持续发展必须善加利用的资源。碳循环的本质是其氧化-还原过程，作为氧化产物的 CO_2 的还原则是未来碳科学与技术的主旋律。我国目前在 CO_2 大规律利用技术上已经取得了很好的进展，达到了国际领先水平。

基于我国能源消费结构，化石能源的主体地位和可再生能源日新月异的发展，化石能源耦合 CO_2 的转化利用技术、零碳能源（包括可再生能源和核能）耦合 CO_2 的转化利用技术以及温和条件下 CO_2 直接转化利用技术成为未来可能适合于中国的以 CO_2 规模化利用技术为核心的碳减排方案。化石能源的易获取性和低成本使得其耦合 CO_2 的转化利用技术近年来飞速发展，以天然气/非常规天然气、焦炉气、工业弛放气等富甲烷气与 CO_2 干重整为核心的转化利用技术在近期内就会产生巨大碳减排潜力和经济效益。以甲烷-二氧化碳干重整耦合合成气直接制烯烃的情景分析为例，2020年可实现各类烯烃产量约为740万吨，同时直接消耗 CO_2 约1 020万吨，产值可达840亿元。

零碳能源发电技术的突飞猛进助力着核能/可再生能源发电耦合 CO_2 生产燃料化学品技术的发展，成为近、中期最具竞争力的 CO_2 大规律利用技术并将带来可观的环保收益和经济效益。太阳能驱动的 CO_2 温和转化是21世纪实现生态碳循环的“筑梦”技术，是最有前景的 CO_2 还原技术，有望在远期得到突破性发展。

参考文献

1 江泽民. 对中国能源问题的思考. 上海交通大学学报, 2008, 42(3): 345-359.

2 国家统计局. 2018年国民经济和社会发展统计公报. 北京: 国家统计局, 2019.

3 Le Quéré C, Andrew R, Friedlingstein P, et al. Global Carbon Budget 2018. Earth System Science Data, 2018, 10: 2141-2194.

4 Falkowski P, Scholes R J, Boyle E, et al. Global carbon cycle: A test of our knowledge of the earth. Science, 2000, 290(5490): 2937-2940.

5 Davis S J, Ken C H, Damon M. Future CO_2 emissions and climate change from existing energy infrastructure. Science, 2010, 329(5997): 1330-1333.

6 Lu J, Zhu C, Pan C, et al. Highly efficient electrochemical reforming of CH_4/CO_2 in a solid oxide electrolyser. Science

Advances, 2018, 4(3): 1-8.

7 佚名. 甲烷二氧化碳制合成气万方级装置实现稳定运行. 能源化工, 2017, 38(4): 6.

8 国家能源局. 能源发展“十三五”规划. 北京: 国家能源局, 2017.

9 中国能源研究会. 中国能源展望2030. 北京: 经济管理出版社, 2016.

10 Olah G A, Prakash G K, SAlain G. Anthropogenic chemical carbon cycle for a sustainable future. Journal of the American Chemical Society, 2011, 133(33): 12881-12898.

11 Wei J, Ge Q, Yao R, et al. Directly converting CO_2 into a gasoline fuel. Nature Communications, 2017, 8: 1-8.

12 Jiao F, Li J, Pan X, et al. Selective conversion of syngas to light olefins. Science, 2016, 351(6277): 1065-1068.

13 Cheng K, Gu B, Liu X, et al. Direct and highly selective conversion of synthesis gas to lower olefins: design of a bifunctional catalyst combining methanol synthesis and carbon-carbon coupling. Angewandte Chemie International Edition, 2016, 55(15): 4725-4733.

14 Wang Y, Zhou W, Kang J, et al. Direct conversion of syngas into methyl acetate, ethanol and ethylene by relay catalysis via dimethyl ether intermediate. Angewandte Chemie International Edition, 2018, 57(37): 12012-12016.

15 Wang L, Zhang W, Zheng X, et al. Incorporating nitrogen atoms into cobalt nanosheets as a strategy to boost catalytic activity toward CO_2 hydrogenation. Nature Energy, 2017, 2(11): 869-876.

16 Li Z, Qu Y, Wang J, et al. Highly selective conversion of carbon dioxide to aromatics over Tandem catalysts. Joule, 2019, 3(2): 570-583.

17 Gao P, Li S, Bu X, et al. Direct conversion of CO_2 into liquid fuels with high selectivity over a bifunctional catalyst. Nature Chemistry, 2017, 9: 1019.

18 国家能源局. 电力发展“十三五”规划（2016—2020年）. 北京: 国家能源局, 2017.

19 Bai X, Chen W, Zhao C, et al. Exclusive formation of formic acid from CO_2 electroreduction by tunable Pd-Snalloy. Angewandte Chemie International Edition, 2017, 55(15): 12219-12223.

20 Song Y, Chen W, Zhao C, et al. Metal-free Nitrogen-doped mesoporous carbon for electroreduction of CO_2 to ethanol. Angewandte Chemie International Editon, 2017, 129(36): 10840-10844.

21 Ma W, Wang H, Yu W, et al. Achieving simultaneous CO_2 and H_2S conversion via a coupled solar-driven electrochemical approach on non-precious catalysts. Angewandte Chemie International Edition, 2018, 57(13): 3473-3477.

22 Zhuang T T, Liang Z Q, Seifitokaldani A, et al. Steering post-C–C coupling selectivity enables high efficiency electroreduction of carbon dioxide to multi-carbon alcohols. Nature Catalysis, 2018, 1(6): 421-428.

23 Buelens L, Galvita V, Poelman H, et al. Super-dry reforming of methane intensifies CO_2 utilization via Le Chatelier’s principle. Science, 2016, 354: 449-452.

24 Wang L, Yi Y, Chunfei W, et al. One-step reforming of CO_2 and CH_4 into high-value liquid chemicals and fuels at room temperature by Plasma-driven catalysis. Angewandte Chemie International Edition, 2017, 56(44): 13679-13683.

25 Luna P, QuinteroB R, Dinh C T, et al. Catalyst electro-redeposition controls morphology and oxidation state for selective carbon dioxide reduction. Nature, 2018, 1: 103-110.

26 Natsui K, Iwakawa H, Ikemiya N, et al. Stable and highly efficient electrochemical production of formic acid from carbon dioxide using diamond electrodes. Angewandte Chemie International Edition, 2018, 57(10): 2639-2643.

27 AsadiM, Kim K, Liu C, et al. Nanostructured transition metal dichalcogenide electrocatalysts for CO_2 reduction in ionic liquid. Science, 2016, 353(6298): 467-470.

Carbon Dioxide Sizable Utilization Technology Based Carbon Reduction Solutions

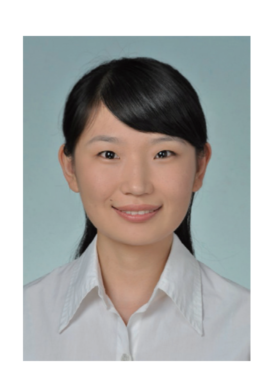
CHEN Qianqian[1] GU Yu[1] TANG Zhiyong[1*] SUN Yuhan[1,2*]

(1 CAS Key Laboratory of Low-carbon Conversion Science and Engineering, Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China;

2 ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China)

Abstract Carbon is the cornerstone of the industrial era of human society. The carbon dioxide (CO_2) produced by human beings using carbon-containing resources should not be a threat to human society or the terminator of carbon resource utilization, but a resource that could be made full use of to achieve sustainable development. Based on the rapid development of CO_2 utilization technology in China, this study proposes several CO_2 reduction schemes that may be suitable for China in the future, with large-scale CO_2 utilization as the core, including the CO_2 conversion and utilization technology coupled with fossil energy or zero-carbon energy, and the direct conversion and utilization technology of CO_2 under mild conditions. Fossil energy coupled with CO_2 conversion and utilization technology, which has experienced rapid growth in recent years due to the easy access and low cost of fossil energy, will bring huge carbon emission reduction potential and economic benefits in the near future. Meanwhile, nuclear/renewable energy assisted CO_2 to fuel and chemicals technology, boosted by the advancement of zero-carbon power generation technologies, promises to be one of the most competitive controllable CO_2 reduction technologies in the medium term. Solar-driven CO_2 conversion technology, which can realize the ecological carbon cycle, is expected to be the most promising CO_2 reduction technology in the long run.

Keyword carbon dioxide utilization, fossil fuel, zero-carbon energy, carbon emission reduction



陈倩倩 中国科学院低碳转化科学与工程重点实验室副研究员。研究方向为能源系统低碳化解决方案，复合能源及低碳能源系统的建模、技术-经济评估和减排潜力的研究。主持并参与多项国家及省部级能源战略相关项目，发表中文核心期刊、SCI学术论文10余篇。E-mail: chenqq@sari.ac.cn

CHEN Qianqian Received Ph.D. degree in 2018 from University of Chinese Academy of Sciences (CAS). She worked as an associate professor in CAS Key Laboratory of Low-carbon Conversion Science and Engineering, Shanghai Advanced Research Institute, CAS. Her research concentrates on the low-carbon solutions of energy conversion systems, modeling of hybrid energy/low carbon energy system, techno-economic assessment of energy conversion systems and related carbon emission reductions study. She have published more than 10 articles in top academic journals including *Joule*, *Applied Energy*, *Energy Conversion and Management*, etc. and received successively support from Science and Technology Committee of Shanghai, international energy companies like Shell, etc. E-mail: chenqq@sari.ac.cn

*Corresponding author



唐志永　中国科学院低碳转化科学与工程重点实验室研究员，博士生导师。长期从事反应工程科学理论与工程实践研究，致力于能源环境领域的反应器技术研发和工业化实施，重点针对中试到工业示范的反应器进行规模设计和放大风险研究，基于多尺度模拟方法和平台进行模拟和预测分析，解决反应器放大设计和系统技术问题。已实现了全球首个万方级二氧化碳重整技术的示范，完成工艺包开发5项，标准规范制定1项，工程装备开发6项，申请专利40余个。承担科技部、中国科学院等部门的20余个重大科研项目，获中国国际工业博览会银奖、中国循环经济专利奖二等奖、中国施工企业协会科技进步奖二等奖等多个奖项。E-mail: tangzy@sari.ac.cn

TANG Zhiyong　Received Ph.D. degree from Southeast University in 2006 and is currently a professor and doctoral supervisor of CAS Key Laboratory of Low-carbon Conversion Science and Engineering. His research mainly includes chemical reaction engineering theory and application, reactor technology R&D and industrial implementation in the energy and environment field, scale design and amplification risk research for pilot-to-industrial demonstration reactors based on multi-scale simulation methods and platforms. So far, Prof. Tang has led his team and successfully realized the world's first demonstration of 10 000 m^3 level CO_2 reforming technology, developed and completed five industrial process packages, six engineering equipment, and a technical standard, with more than 40 patents authorized. Prof. Tang has undertaken over 20 key scientific research projects supported by the Ministry of Science and Technology, Chinese Academy of Sciences (CAS), etc., and won many awards such as the Silver Award of the 17th China International Industry Fair, the Second Prize of China Circular Economy Patent Award. E-mail: tangzy@sari.ac.cn



孙予罕　中国科学院低碳转化科学与工程重点实验室主任，研究员，博士生导师。入选中国科学院“百人计划”，国家杰出青年科学基金获得者。先后发表学术论文500余篇，申请国家发明专利100余项。获中国科学院自然科学奖三等奖、全国先进工作者、中国科学院载人航天贡献奖、中国科学院杰出科技成就奖。中国化学会理事，中国颗粒学会理事，中国能源研究会会员，山西省政府决策与咨询委员会委员。主要研究领域包括煤间接液化合成油品和化学品，CO_2转化利用中催化和工程研究，纳米材料及其在绿色化学和光学中的应用研究。E-mail: sunyh@sari.ac.cn

SUN Yuhan　Professor, Doctoral Supervisor and Director of CAS Key Laboratory of Low-carbon Conversion Science and Engineering. He has published over 500 papers on peer-reviewed journals and more than 100 patents applied. He is one of those who were firstly selected into the Hundred Talents Program of CAS in 1994 and was granted the Ntional Science Fund for Distinguished Young Scholars for his academic achievements in 1996. He won the Outstanding Achievement Award of CAS, Third Prize for Natural Science Award of CAS, Model Worker of the Nation, Award for Outstanding Contribution to Manned Spaceflight of CAS, etc. He is also on the board of Chemistry Society of China and Particle Society of China, and is a member of China Energy Research Society, a member of the Decision and Consultation Committee of Shanxi Provincial Government. His research interests include C1 chemistry on coal/natural gas-based synfules and chemicals, catalysis and engineering for CO_2 utilization, application of nano-materials in green chemistry and optical film, etc. Email: sunyh@sari.ac.cn

■责任编辑：岳凌生

参考文献（双语版）

1 江泽民. 对中国能源问题的思考. 上海交通大学学报, 2008, 42(3): 345-359.

Jiang Z M. Reflections on energy issues in China. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2008, 42(3): 345-359. (in Chinese)

2 国家统计局. 2018年国民经济和社会发展统计公报. 北京: 国家统计局, 2019.

National Bureau of Statistics. Statistical Bulletin of National Economic and Social Development in 2018. Beijing: National Bureau of Statistics, 2019. (in Chinese)

3 Le Quéré C, Andrew R, Friedlingstein P, et al. Global Carbon Budget 2018. Earth System Science Data, 2018, 10: 2141-2194.

4 Falkowski P, Scholes R J, Boyle E, et al. The global carbon cycle: A test of our knowledge of the earth as a system. Science, 2000, 290(5490): 291-296.

5 Davis S J, Ken C H, Damon M. Future CO_2 emissions and climate change from existing energy infrastructure. Science, 2010, 329(5997): 1330-1333.

6 Lu J H, Zhu C L, Pan C C, et al. Highly efficient electrochemical reforming of CH_4/CO_2 in a solid oxide electrolyser. Science Advances, 2018, 4(3): eaar5100.

7 能源化工. 甲烷二氧化碳制合成气万方级装置实现稳定运行. 能源化工, 2017, 38(4): 6.

Energy Chemical Industry. Stable operation of the ten thousand-square-scale unit for producing syngas from carbon dioxide. Energy Chemical Industry, 2017, 38(4): 6. (in Chinese)

8 国家能源局. 能源发展“十三五”规划. 北京: 国家能源局, 2017.

National Energy Administration. The 13th Five-Year Plan for Energy Development. Beijing: National Energy Administration, 2017. (in Chinese)

9 中国能源研究会. 中国能源展望2030. 北京: 经济管理出版社, 2016.

China Energy Research Society. China Energy Outlook 2030. Beijing: Economy & Management Publishing House, 2016. (in Chinese)

10 Olah G A, Prakash G K S, Alain G. Anthropogenic chemical carbon cycle for a sustainable future. Journal of the American Chemical Society, 2011, 133(33): 12881-12898.

11 Wei J, Ge Q J, Yao R W, et al. Directly converting CO_2 into a gasoline fuel. Nature Communications, 2017, 8: 15174.

12 Jiao F, Li J J, Pan X L, et al. Selective conversion of syngas to light olefins. Science, 2016, 351(6277): 1065-1068.

13 Cheng K, Gu B, Liu X L, et al. Direct and highly selective conversion of synthesis gas into lower olefins: Design of a bifunctional catalyst combining methanol synthesis and carbon-carbon coupling. Angewandte Chemie International Edition, 2016, 55(15): 4725-4733.

14 Wang Y, Zhou W, Kang J, et al. Direct conversion of syngas into methyl acetate, ethanol, and ethylene by relay catalysis via dimethyl ether intermediate. Angewandte Chemie International Edition, 2018, 57(37): 12012-12016.

15 Wang L B, Zhang W B, Zheng X S, et al. Incorporating nitrogen atoms into cobalt nanosheets as a strategy to boost catalytic activity toward CO_2 hydrogenation. Nature Energy, 2017, 2(11): 869-876.

16 Li Z L, Qu Y Z, Wang J J, et al. Highly selective conversion of carbon dioxide to aromatics over Tandem catalysts. Joule, 2019, 3(2): 570-583.

17 Gao P, Li S G, Bu X N, et al. Direct conversion of CO_2 into liquid fuels with high selectivity over a bifunctional catalyst. Nature Chemistry, 2017, 9(10): 1019-1024.

18 国家能源局. 电力发展“十三五”规划（2016—2020年）. 北京: 国家能源局, 2017.

National Energy Administration. The 13th Five-Year Plan for Electric Power Development (2016—2020). Beijing: National Energy Administration, 2017. (in Chinese)

19 Bai X F, Chen W, Zhao C C, et al. Exclusive formation of formic acid from CO_2 electroreduction by tunable Pd-Sn alloy. Angewandte Chemie International Editon, 2017, 55(15): 12219-12223.

20 Song Y F, Chen W, Zhao C C, et al. Metal-free Nitrogen-doped mesoporous carbon for electroreduction of CO_2 to ethanol. Angewandte Chemie International Editon, 2017, 56(36): 10840-10844.

21 Ma W G, Wang H, Yu W, et al. Achieving simultaneous CO_2 and H_2S conversion via a coupled solar-driven electrochemical approach on non-precious-metal catalysts. Angewandte Chemie International Edition, 2018, 57(13): 3473-3477.

22 Zhuang T T, Liang Z Q, Seifitokaldani A, et al. Steering post-C–C coupling selectivity enables high efficiency electroreduction of carbon dioxide to multi-carbon alcohols. Nature Catalysis, 2018, 1(6): 421-428.

23 Buelens L C, Galvita V, Poelman H, et al. Super-dry reforming of methane intensifies CO_2 utilization via Le Chatelier's principle. Science, 2016, 354(6311): 449-452.

24 Wang L, Yi Y, Wu C F, et al. One-step reforming of CO_2 and CH_4 into high-value liquid chemicals and fuels at room temperature by Plasma-driven catalysis. Angewandte Chemie International Edition, 2017, 56(44): 13679-13683.

25 Luna P, QuinteroB R, Dinh C T, et al. Catalyst electro-redeposition controls morphology and oxidation state for selective carbon dioxide reduction. Nature Catalysis, 2018, 1(2): 103-110.

26 Natsui K, Iwakawa H, Ikemiya N, et al. Stable and highly efficient electrochemical production of formic acid from carbon dioxide using diamond electrodes. Angewandte Chemie International Edition, 2018, 57(10): 2639-2643.

27 Asadi M, Kim K, Liu C, et al. Nanostructured transition metal dichalcogenide electrocatalysts for CO_2 reduction in ionic liquid. Science, 2016, 353(6298): 467-470.